

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) RU (11) **178 030** (13) U1

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ  
(51) МПК  
[H04B 1/10 \(2006.01\)](#)

## (12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

Статус: может прекратить свое действие (последнее изменение статуса: 27.02.2019)  
Пошлина: учтена за 2 год с 25.10.2017 по 24.10.2018

(21)(22) Заявка: [2016141697](#), 24.10.2016(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
24.10.2016Дата регистрации:  
21.03.2018

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 24.10.2016

(45) Опубликовано: [21.03.2018](#) Бюл. № 9

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: ВАЛЕЕВ В.Г. и др. **Нелинейная обработка сигналов для подавления помех в приемном тракте радиоэлектронных систем**, ж.Радиотехника, 2010, номер 6, с. 37-42. SU 1589403 A1 (УПИ), 30.08.1990. RU 2115237 C1 (СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ), 10.07.1998. RU 69687 U1(ГОУ ВПО "УГТУ-УПИ"), 27.12.2007. RU 2360360 C1 (ОАО "УПКБ "Деталь"), 27.06.2009.

Адрес для переписки:

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19,  
УРФУ, Центр интеллектуальной  
собственности, Маркс Т.В.

(72) Автор(ы):

**Язовский Александр Афонасьевич (RU),  
Милащенко Егор Александрович (RU),  
Щепочкин Игорь Николаевич (RU),  
Щепочкина Юлия Александровна (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

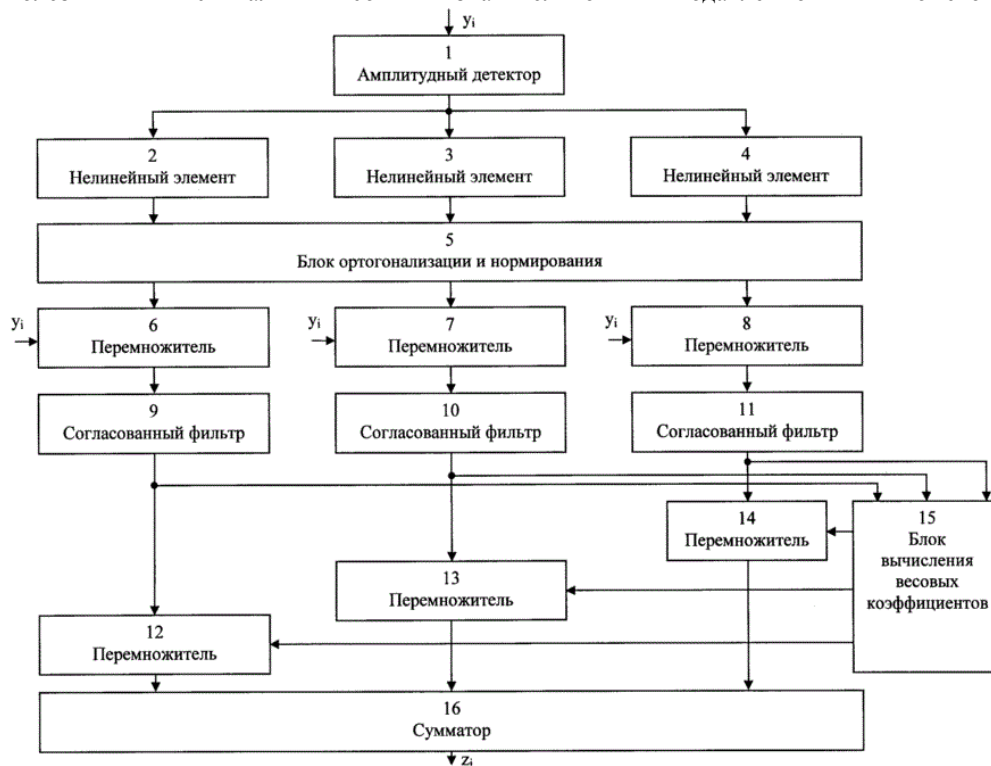
**Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Уральский федеральный  
университет имени первого Президента  
России Б.Н. Ельцина" (RU)**

## (54) УСТРОЙСТВО ПОДАВЛЕНИЯ УЗКОПОЛОСНЫХ ПОМЕХ

(57) Реферат:

Устройство относится к области радиоэлектроники и может быть использовано в радиоприемных устройствах, работающих в условиях узкополосных помех. Техническая задача, на решение которой направлено заявляемое устройство, состоит в обеспечении подавления узкополосных помех вне зависимости от плотности вероятности амплитуды помехи и исключения подавления полезного сигнала на выходе устройства при воздействии помех малой мощности или полном отсутствии помех. Решение данной задачи достигается тем, что устройство содержит амплитудный детектор, на вход которого поступает смесь полезного сигнала и помехи,  $Q$  нелинейных элементов, блок ортогонализации и нормирования,  $2Q$  перемножителей,  $Q$  согласованных фильтров, блок вычисления весовых коэффициентов и сумматор, при этом вход каждого нелинейного элемента соединен с выходом амплитудного детектора, выход каждого нелинейного элемента соединен с соответствующим входом блока ортогонализации и нормирования, соответствующий выход которого соединен с первым входом соответствующего перемножителя, второй вход которого соединен с входом амплитудного детектора, а выход соединен с входом соответствующего согласованного фильтра, выход которого соединен с

соответствующим входом блока вычисления весовых коэффициентов, а также с первым входом соответствующего перемножителя, второй вход которого соединен с соответствующим выходом блока вычисления весовых коэффициентов, а выход соединен с соответствующим входом общего сумматора, на выходе которого получаем полезный сигнал со значительно подавленной помехой.



Фиг. 1

Устройство подавления узкополосных помех относится к области радиоэлектроники и может быть использовано в радиоприемных устройствах, работающих в условиях узкополосных помех.

Известны устройства подавления узкополосных помех, представленные в [1-3].

Основным недостатком рассмотренных устройств является то, что они не позволяют добиться максимальной эффективности подавления помех, поскольку не являются адаптивными относительно плотности распределения амплитуды помех.

Наиболее близким аналогом (прототипом) по технической сущности и принципу действия является устройство подавления узкополосных помех, описанное в [2, стр. 300, рис. 5.12a]. Это устройство содержит последовательно включенные амплитудный детектор, нелинейный элемент, первый умножитель, второй вход которого соединен с выходом полосового ограничителя, вход которого соединен с входом амплитудного детектора. Выход первого умножителя является выходом устройства нелинейного подавления помех, где получаем полезный сигнал с частично подавленной помехой.

Технический результат работы прототипа заключается в обнаружении сигналов на фоне узкополосных помех при нелинейной обработке огибающей входной смеси полезного сигнала и помехи.

К недостаткам прототипа следует отнести:

- устройство рассчитано на работу в условиях малого отношения сигнал/помеха, при большом отношении сигнал/помеха эффективность подавления сильно снижается, т.е. устройство реализует алгоритм подавления помехи, который не учитывает отсутствие на входе устройства помехи. При возникновении такой ситуации вместо помехи будет подавлен полезный сигнал;
- необходимо иметь априорную информацию о плотности распределения помехи, которая чаще всего неизвестна, или изменяется с течением времени, т.е. устройство не является адаптивным.

Таким образом, техническая задача, на решение которой направлено заявляемое устройство, состоит в том, чтобы создать устройство подавления узкополосных помех, которое является адаптивным относительно плотности распределения амплитуды помех, и эффективность которого не зависит от величины отношения сигнал/помеха.

Технический результат достигается тем, что устройство подавления узкополосных помех содержит (см. фиг. 1), амплитудный детектор, Q нелинейных элементов, блок ортогонализации и нормирования, 2Q перемножителей, Q согласованных фильтров, блок вычисления весовых коэффициентов и сумматор, при этом вход каждого нелинейного элемента 2, 3, 4 соединен с выходом амплитудного детектора 1, выход каждого нелинейного элемента 2, 3, 4 соединен с соответствующим входом блока ортогонализации и нормирования 5, соответствующий выход которого соединен с первым входом соответствующего перемножителя 6, 7, 8, второй вход которого

соединен с входом амплитудного детектора 1, а выход соединен с входом соответствующего согласованного фильтра 9, 10, 11, выход которого соединен с соответствующим входом блока вычисления весовых коэффициентов 15, а также с первым входом соответствующего перемножителя 12, 13, 14, второй вход которого соединен с соответствующим выходом блока вычисления весовых коэффициентов 15, а выход соединен с соответствующим входом общего сумматора 16.

Параметр Q может принимать любые положительные целые значения. На фиг. 1 представлена структурная схема устройства подавления узкополосных помех для случая Q=3.

Предлагаемое устройство выделяет огибающую входной смеси помехи и шума, делит полученный процесс на Q параллельных безынерционных нелинейных линейно-независимых каналов с последующей взаимной их ортогонализацией и нормированием по энергии, подвергает согласованной с огибающей полезного сигнала фильтрации в каждом ортонормированном канале, а также суммирует согласованные отклики каждого канала с определенным весом, причем вектор весовых коэффициентов суммирования является собственным вектором, соответствующим максимальному собственному значению матрицы взаимных ковариаций согласованных откликов.

Предлагаемое устройство не использует ограничение о слабом по сравнению с помехой полезном сигнале на входе и не требует предположений относительно вероятностных характеристик помехи. Единственное ограничение - наличие согласованной фильтрации. В силу известного факта - ее инвариантности относительно амплитуды, фазы и времени прихода полезного сигнала на входе - следует аналогичная инвариантность предлагаемого устройства.

Таким образом, техническим результатом работы устройства является отсутствие необходимости иметь априорную информацию о плотности распределения помехи, а также отсутствие ограничения о слабом по сравнению с помехой полезном сигнале на входе.

Амплитудный детектор 1 может быть выполнен на полупроводниковых диодах, как указано в [4, стр. 123, рис. 7.1], или с применением операционных усилителей [5, стр. 109, рис. 5.10].

Остальные блоки устройства могут быть выполнены на микропроцессоре или сигнальном процессоре, у которого есть многоканальный АЦП, например, MultiClet R1 (см. руководство по эксплуатации) или TMS320F28335 (см. руководство по эксплуатации) с применением отдельного многоканального АЦП, например, AD7779 (см. руководство по эксплуатации).

Блок ортогонализации и нормирования может быть реализован, например, по методу Грамма-Шмидта [6, стр. 164].

Блок определения весовых коэффициентов реализуется путем решения классической задачи поиска собственного вектора, который соответствует максимальному собственному значению матрицы взаимных ковариаций откликов согласованных фильтров [7, стр. 82].

Работу устройства можно описать следующим образом.

Любой узкополосный процесс  $y(t)$  можно представить в виде:

$$y(t) = \dot{A}(t)e^{j\omega_0 t}, \quad (1)$$

где

$$\dot{A}(t) = A(t)e^{j\varphi(t)} \quad \text{- комплексная огибающая процесса } y(t),$$

которая содержит огибающую  $A(t)$  и фазу  $\varphi(t)$ .

Любое безынерционное нелинейное преобразование

$$f[y(t)] \quad \text{изменяет}$$

только огибающую  $A(t)$  процесса  $y(t)$ :

$$f[y(t)] = f[A(t)e^{j\omega_0 t} e^{j\varphi(t)}] = u[A(t)]e^{j\omega_0 t} e^{j\varphi(t)} = \frac{u[A(t)]}{A(t)} y(t), \quad (2)$$

где

$u[A(t)]$  - амплитудная характеристика нелинейного преобразователя по первой гармонике частоты  $\omega_0$ .

Представим амплитудную характеристику нелинейного преобразователя по первой гармонике обобщенным полиномом

$$u[A(t)] = h v[A(t)], \quad (3)$$

где

$h = \{h_1, h_2 \dots h_Q\}^T$  - вектор столбец параметров настройки нелинейного преобразователя,

$$v[A(t)] = \{v_1[A(t)], v_2[A(t)] \dots v_Q[A(t)]\}^T$$

система линейно-независимых базисных функций.

Тогда

$$f[y(t)] = \frac{h^T v[A(t)]}{A(t)} y(t). \quad (4)$$

Заменим непрерывные функции времени совокупностью их дискретных отчетов в моменты времени  $t_i = i\Delta t$ , тогда  $y(t_i) = y_i$ ,  $A(t_i) = A_i$ ,  $\phi(t_i) = \phi_i$  где  $i \in [1 \dots N]$  - целое число, количество отчетов сигнала.

Отчеты процессов на выходах базисных функций можно объединить в прямоугольной  $N \times Q$  матрице  $D$  с элементами

$$d_{i,k} = \frac{v_k(A_i)}{A_i} y_i$$

Если матрицу  $D$  с элементами  $d_{i,k}$  представить совокупностью векторов

$$D = \{d^{(1)}, d^{(2)} \dots d^{(Q)}\}, \text{ то совокупность отчетов}$$

на выходе нелинейного преобразователя  $f = \{f(y_1), f(y_2) \dots f(y_N)\}^T$  можно представить в виде  $f = Dh$ , а энергию на его выходе, равную энергии на входе СФ

$$E_{\text{вх}} = f^T \bar{f}. \quad (5)$$

Примем, что согласованный фильтр имеет комплексную импульсную характеристику  $g(t_j) = g_j$ , где  $j \in [1 \dots M]$  - целое число, количество отчетов импульсной характеристики.

В силу линейности  $u[A(t)]$  относительно параметров настройки  $h$ , отклик устройства подавления узкополосных помех  $z(t_i) = z_i$  можно представить суммой откликов, полученных от каждой базисной функции

$$v_k(A_i)$$

$$z_i = \sum_{j=0}^{M-1} f(y_{i-j}) g_j = \sum_{k=1}^Q h_k \sum_{j=0}^{M-1} \frac{v_k(A_{i-j})}{A_{i-j}} y_{i-j} \bar{g}_j = \sum_{k=1}^Q h_k \sum_{j=0}^{M-1} d_{i-j,k} \bar{g}_j. \quad (6)$$

Обозначим совокупность отчетов на выходах согласованных фильтров прямоугольной матрицей  $R$  с элементами

$$r_{i,k} = \sum_{j=0}^{M-1} \frac{v_k(A_{i-j})}{A_{i-j}} y_{i-j} \bar{g}_j = \sum_{j=0}^{M-1} d_{i-j,k} \bar{g}_j. \quad (7)$$

Тогда совокупность отчетов  $Z = \{z_1, z_2 \dots z_M\}^T$  на выходе устройства подавления узкополосных помех может быть представлена в виде  $Z = Rh$ , а энергию на его выходе, т.е. на выходе СФ

$$E_{\text{вых}} = Z^T \bar{Z}. \quad (8)$$

Устройство должно адаптироваться к принимаемым помехам таким образом, чтобы обеспечить максимальное отношение энергии на выходе согласованного фильтра к энергии на его входе, если представить устройство простым эквивалентом вида нелинейный преобразователь плюс согласованный фильтр. Тогда энергия на входе согласованного фильтра есть энергия на выходе весовой суммы нелинейных преобразователей, амплитудные характеристики которых образуют систему ортонормированных функций. Таким образом, показатель эффективности  $K_E$  настройки нелинейного преобразователя, равен отношению энергии на выходе  $E_{\text{вых}}$  и входе  $E_{\text{вх}}$  согласованного фильтра, которые определяются выражениями:

$$E_{\text{вых}} = Z^T \bar{Z} = (Rh)^T \bar{R}h = h^T R^T \bar{R}h, \quad (9)$$

$$E_{\text{вх}} = f^T \bar{f} = (Dh)^T \bar{D}h = D^T h^T \bar{D}h. \quad (10)$$

Оптимальными значениями параметров настройки нелинейного преобразователя будем считать такие  $h_{\text{онм}}$ , при которых достигается максимум этого показателя.

Обозначим

$$A = R^T \bar{R}, \quad B = D^T \bar{D}, \quad \text{тогда}$$

показатель эффективности примет вид обобщенного отношения Релея:

$$K_E = \frac{h^T A h}{h^T B h} \leq \lambda_{\max}. \quad (11)$$

Его максимизация эквивалентна поиску максимального собственного значения  $\lambda_{\max}$  и соответствующего ему собственного вектора  $h_{\text{онм}}$ , которые являются решением уравнения

$$Ah = \lambda Bh. \quad (12)$$

В частности, если базисные функции

$$v(A)$$
 являются

ортонормированными, то матрица  $B$  становится единичной и поиск оптимальных параметров  $h_{\text{онм}}$  сводится к решению классической проблемы собственных значений.

Для оценки эффективности устройства подавления узкополосных помех проведено математическое моделирование его работы в условиях следующих типов помех: гармонических и от взволнованной морской поверхности.

В таблице 1 приведены значения выигрыша  $\mu$  для устройства подавления узкополосных помех и максимально возможного выигрыша  $\mu_{\max}$  (значения в таблице даны в скобках) для условий гармонической помехи [2, стр. 301, рис. 5.13], при разном отношении «помеха/шум»  $\alpha$  (базисные функции - степенной полином порядка  $m$ ).

Таблица 1

$\alpha$ , дБ	$m$	
	1	2
	$\mu (\mu_{\max})$ , дБ	$\mu (\mu_{\max})$ , дБ
0	0 (0.5)	0 (0.5)
10	8 (8)	8 (8)
20	18 (20)	18 (20)
30	26 (27)	27 (27)
40	37 (37)	37 (37)

В таблице 2 приведены значения выигрыша  $\mu$  для устройства подавления узкополосных помех и максимально возможного выигрыша  $\mu_{\max}$  (значения в таблице даны в скобках), рассчитанного по методике [8], для условий морской помехи с К-распределением плотности вероятности [9, стр. 113, формула 4.33], при разном отношении «помеха/шум»  $\alpha$  (три варианта параметров помехи:

$$v=0.5 \text{ и}$$

$b=0.5$ ,

$$v=1 \text{ и } b=0.5,$$

$$v=1.5$$

и  $b=0.5$ , базисные функции -

степенной полином порядка  $m$ ).

Таблица 2

$v=0.5$ и $b=0.5$			
$\alpha$ , дБ	$m$		
	1	2	3
	$\mu$ ( $\mu_{max}$ ), дБ	$\mu$ ( $\mu_{max}$ ), дБ	$\mu$ ( $\mu_{max}$ ), дБ
0	0 (0.8)	0 (1)	0 (1)
10	2.5 (4.5)	2.5 (4.5)	3 (4.5)
20	7.2 (8.3)	7.5 (8.6)	7.5 (8.8)
30	9.5 (11.3)	10 (11.9)	10 (12.3)
40	10.2 (13.6)	10.5 (14.5)	12 (15.1)
$v=1$ и $b=0.5$			
$\alpha$ , дБ	$m$		
	1	2	3
	$\mu$ ( $\mu_{max}$ ), дБ	$\mu$ ( $\mu_{max}$ ), дБ	$\mu$ ( $\mu_{max}$ ), дБ
0	0 (0.3)	0 (0.5)	0 (0.5)
10	1 (2)	1 (2)	0 (2.1)
20	2.5 (3.3)	2.5 (3.4)	2.5 (3.4)
30	3.1 (3.9)	3.5 (4)	2.5 (4)
40	4 (4)	4 (4.2)	2 (4.2)
$v=1.5$ и $b=0.5$			
$\alpha$ , дБ	$m$		
	1	2	3
	$\mu$ ( $\mu_{max}$ ), дБ	$\mu$ ( $\mu_{max}$ ), дБ	$\mu$ ( $\mu_{max}$ ), дБ
0	0 (0.2)	0 (0.3)	0 (0.3)
10	0 (1.1)	0 (1.1)	1 (1.1)
20	1.5 (1.6)	1.5 (1.6)	1.5 (1.6)
30	1.5 (1.7)	1.5 (1.7)	1.6 (1.7)
40	1.5 (1.7)	1.5 (1.7)	1.6 (1.7)

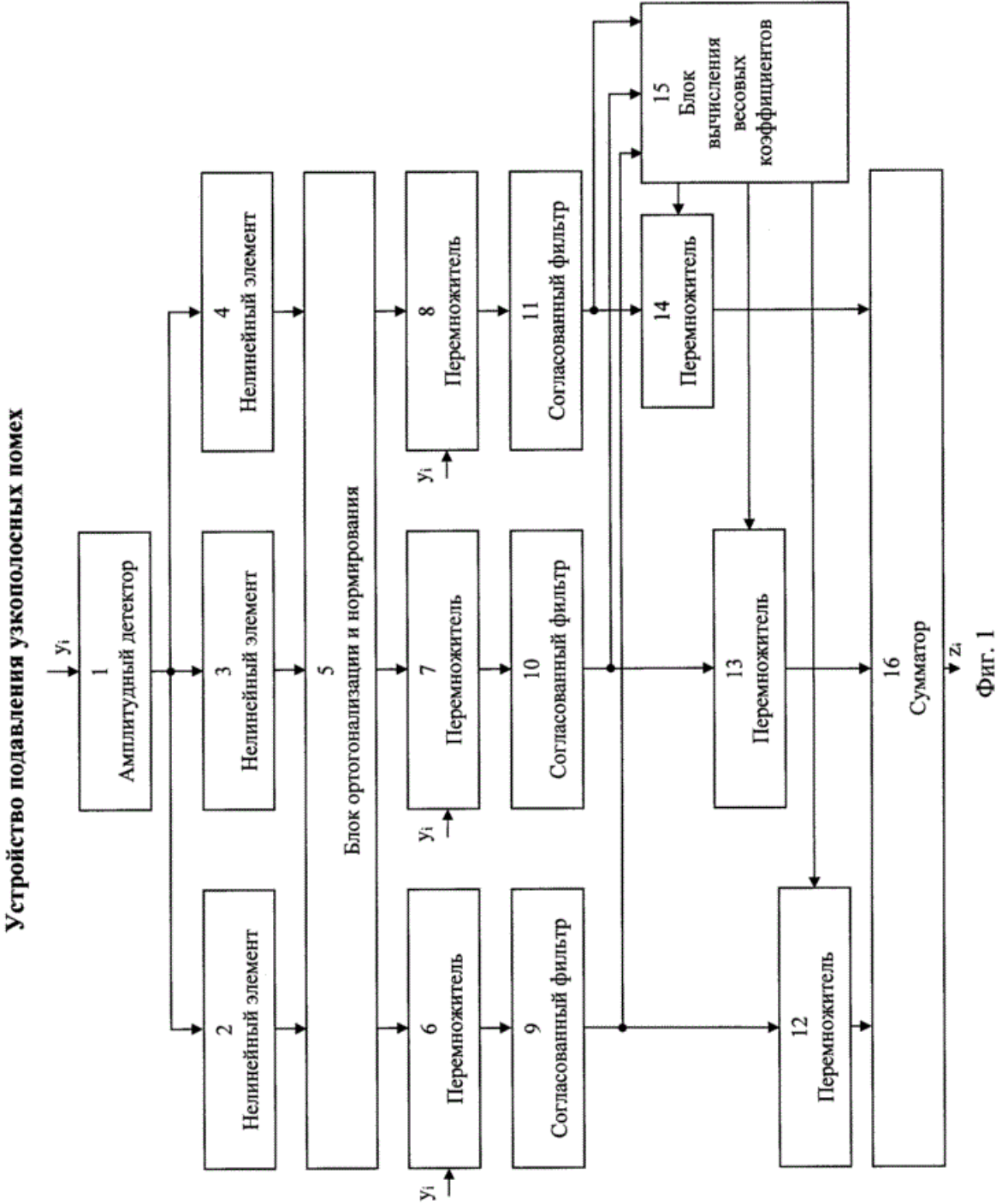
По таблицам 1 и 2 можно сделать вывод, что эффективность предлагаемого устройства подавления узкополосных помех в основном незначительно (1-2 дБ) отличается от максимально возможной эффективности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РФ №2360360 С1, МПК H04B 1/00, опубл. 27.06.2009.
2. П.А. Бакут. Теория обнаружения сигналов. М.: Радио и связь, 1984. 440 с. Стр. 300, рис. 5.12а.
3. Патент РФ №2352063 С1, МПК H04B 1/10, опубл. 10.04.2009.
4. Радиоприемные устройства / Под ред. А.П. Жуковского. М.: Высшая школа, 1989. 342 с.
5. В.И. Щербаков, Г.И. Грездов. Электронные схемы на операционных усилителях: Справочник. К.: Техника, 1983. 213 с.
6. В.В. Воеводин, Ю.А. Кузнецов. Матрицы и вычисления. М.: Наука, 1984. 320 с.
7. Ф.Р. Гантмахер. Теория матриц. М.: Наука, 1966. 576 с.
8. В.Г. Валеев, А.А. Язовский. Адаптивные нелинейные преобразователи для подавления негауссовских помех // Киевский политехнический институт. Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 1987. №8. Том 30. С. 62-64.
9. K. Ward, R. Tough, S. Watts. Sea clutter: scattering, the K distribution and radar performance. Croydon: CPI Group Ltd, 2006. 452 p.

#### Формула полезной модели

Устройство подавления узкополосных помех, содержащее амплитудный детектор, отличающееся тем, что в устройство введены Q нелинейных элементов, амплитудные характеристики которых образуют систему из Q линейно-независимых функций, блок ортогонализации и нормирования,  $2^*Q$  перемножителей, Q согласованных фильтров, блок вычисления весовых коэффициентов и сумматор, при этом вход каждого нелинейного элемента соединен с выходом амплитудного детектора, выход каждого нелинейного элемента соединен с соответствующим входом блока ортогонализации и нормирования, соответствующий выход которого соединен с первым входом соответствующего перемножителя, второй вход которого соединен с входом амплитудного детектора, а выход соединен с входом соответствующего согласованного фильтра, выход которого соединен с соответствующим входом блока вычисления весовых коэффициентов, а также с первым входом соответствующего перемножителя, второй вход которого соединен с соответствующим выходом блока вычисления весовых коэффициентов, а выход соединен с соответствующим входом общего сумматора.



Фиг. 1